

# 光纤孤立子与光孤子通信

代红英, 汪仲清

(重庆邮电学院, 重庆 400065)

**摘 要:** 光纤的一个重要特征: 线性和非线性效应, 如群速度色散效应和Kerr非线性效应。首先介绍了光孤子的概念、历史的研究, 然后讨论了单模光纤中光孤子形成的物理机制, 比较了光孤子通信和光纤通信的优缺点, 最后探讨了孤子间相互作用对光孤子通信系统的影响。

**关键词:** 光纤色散; 光纤非线性; 光孤子; 光孤子通信

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A

## 1 孤立子与光孤子

人们对孤立子的研究, 可以追溯到1834年<sup>[1]</sup>, 英国海军工程师J. S. Russell沿运河行走时偶然观察到一种奇特的水波, 这种水波“平滑而轮廓分明”, 并在快速行进过程中其形状、幅度和速度都基本保持不变, 他认为这种波是流体力学中的一个稳定解, 称它为“孤立波(solitary wave)”。1896年, 荷兰数学家Korteweg和De Vries研究了浅水波的波动, 建立了著名的KDV方程, 并得到了与J. S. Russell观察相一致的形状不变的孤立波解。1965年, 美国Bell实验室的物理学家N. Zabusky和数学家M. D. Kruskal在研究等离子体孤立波的碰撞过程时发现: 孤立波在相互碰撞后, 除相位外, 仍然保持其形状、幅度和速度不变, 并遵循动量和能量守恒定律, 类似于粒子的特性, 故被称为“孤立子”或“孤子(soliton)”。1973年, A. Hasegawa和F. Tappert<sup>[2]</sup>首次提出了“光孤子(optical soliton)”的概念, 即光孤子与其他同类光孤子相遇后, 维持其幅度、形状和速度不变, 并从理论上证明了光纤中的色散效应和非线性自相位调制效应达到平衡时, 光纤中可以传播无色散的光脉冲。1980年, F. Mollenauer<sup>[3]</sup>等人用实验方法在700 m光纤中观察到了脉宽为7 ps的光孤子, 并提出将光纤中的光孤子用作传递信息的载体, 构建一种新的光纤通信系统方案, 称为光纤孤立子通信, 或简称为光孤子通信。

## 2 光孤子形成的物理机制

单模光纤中有2种最基本的物理效应, 即群速度色散(GVD: group velocity dispersion)效应和自

相位调制(SPM: self-phase modulation)效应。群速度色散效应起源于介质的响应与光频率有关, 它表明光脉冲的群速度与光频存在着一定的关系, 其作用的结果是使光纤中传输的光脉冲被展宽; 自相位调制效应是指光脉冲在光纤中传播时其本身引起的相位变化, 它起源于光纤的折射率 $n$ 与光场 $E$ 之间的Kerr型非线性关系, 即 $n = n_0 + n_2 |E|^2$ , 其作用的结果是使光脉冲被压窄; 当2种对立的机制达到平衡时, 光纤中就会产生一种新的传输不变形的光脉冲, 即光孤子。

### 2.1 光纤的色散

光纤的色散是指光纤中光脉冲的不同频率成分或模式成分的群速不同而使光脉冲散开的一种物理现象。它使光脉冲在传输过程中被展宽或畸变, 其最终结果是相邻脉冲相互交叠, 当交叠达到一定程度后, 接收端无法将相邻脉冲区分开, 就会发生误码, 因此, 光纤色散特性限制了光纤的传输码速率和传输距离, 使光纤通信系统的质量下降。从波动光学的理论来分析, 光纤的色散是光纤介质对光场的响应, 即光纤介质的折射率与光的频率有关。单模光纤是在一定工作波长下传输单一基模的光纤, 它基本消除了模式色散, 主要有材料色散和波导色散, 这2种色散在实际测量中很难分开, 由于它们都是由相位常数随频率(或波长)变化而引起的, 故统称频率色散。

单模光纤的色散一般用色散系数 $D$ 来表示, 它定义为单位线宽光源在单位长度单模光纤上引起的时延差, 其单位为ps/(km·nm), 即<sup>[4,5]</sup>

$$D = \frac{\Delta\tau_0}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

• 收稿日期: 2003-05-15 修订日期: 2004-03-16

作者简介: 代红英(1977-), 女, 重庆丰都人, 硕士研究生, 研究方向为光孤子通信。E-mail: daihyeq@163.com.

式(1)中,  $\Delta\tau_0$  为光纤的时延差;  $\Delta\lambda$  为光源的线宽。  $D=0$  处的波长被称为零色散波长, 记作  $\lambda_D$ , 对于常规光纤,  $\lambda_D=1.31\ \mu\text{m}$ 。光波波长  $\lambda<\lambda_D$  的区域被称为正常色散区域(正色散区), 光波波长  $\lambda>\lambda_D$  的区域被称为反常色散区域(反色散区)。为了同时得到低损耗和低色散, 通常是将光纤的零色散点移到波长  $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$  处, 以与光纤最低损耗波段一致, 所对应的光纤为**色散位移光纤DSF**(dispersion shift fiber)。色散位移光纤是光纤通信系统普遍使用的单模光纤。

由于光脉冲都可以表示为不同频率分量的组合, 它在光纤中传输时, 光纤的色散引起不同频率分量传输速率不同, 造成光脉冲在传输过程中发生变形。研究表明<sup>[6]</sup>, 光脉冲的传输特性在正常色散区域和反常色散区域中有所不同, 在正常色散区域光脉冲的高频分量(蓝移)较低频分量(红移)传输得慢, 而在反常色散区域光脉冲传输情况正好相反, 但二者的最终结果都会导致光脉冲被展宽。因此, 光纤的色散是线性光纤通信系统实现超高码速率、超长距离传输的严重障碍。

## 2.2 光纤的非线性效应

当光纤介质受到光场的作用时, 组成介质的原子或分子内部的电子相对于原子核就会发生微小的位移或振动, 使介质产生极化。即是说光场的存在使得介质的特性发生了变化。极化后的介质内出现了会辐射出相应频率电磁波的偶极子, 当极化强度矢量  $P$  与电场强度矢量  $E$  的关系是线性时, 介质表现出线性特性; 反之, 介质表现出非线性特性。**光纤的非线性是光场和光纤相互作用时发生的一种物理现象**, 在光纤中, 当光场较弱时光纤的各项特性参量随光场做线性变化, 光纤是线性介质, 当光场较强时, 光纤就会表现出非线性, 这种非线性光学效应的强弱不仅与光场有关, 而且与光纤的长度有关。

考虑光纤非线性影响后, 在光场作用下, 光纤介质的电极化强度矢量  $P$  可写作为<sup>[7]</sup>

$$P = \epsilon_0 [x^{(1)} \cdot E + x^{(2)} : EE + x^{(3)} : EEE + \dots] \quad (2)$$

式(2)中,  $\epsilon_0$  为真空的介电常数,  $x^{(j)}$  ( $j=1, 2, 3, \dots$ ) 为  $j$  阶电极化率, 且  $x^{(1)} \gg x^{(2)} \gg x^{(3)}$ 。其中, 线性电极化率  $x^{(1)}$  决定线性折射率  $n_0$  和光纤损耗  $\alpha$ ,  $x^{(2)}$  会引起二次谐波, 但对分子结构对称的  $\text{SiO}_2$  光纤而言  $x^{(2)}=0$ , 因此  $x^{(3)}$  是光纤中最低阶亦是最重要的非线性效应。 $x^{(3)}$  的作用引起折射率随光场的非线性变化(Kerr效应)用下式表示, 即<sup>[8]</sup>

$$n = n_0 + n_2 |E|^2 \quad (3)$$

式(3)中,  $n_0$  为光纤线性折射率,  $n_2$  为与  $x^{(3)}$  相关的

非线性折射率。

若光脉冲的中心波长为  $\lambda_0$ , 在光纤中传输的长度为  $L$ , 则附加的相位移动为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 |E|^2 L \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知, 光脉冲在光纤中传输时, 由于光脉冲本身的光场引起介质折射率的变化而导致光脉冲波包的相位移动, 结果造成脉冲谱的变化, 这种效应称为自相位调制(SPM)效应。虽然光纤的  $n$  不大但长度  $L$  很长, 因此光纤中有显著的非线性效应。

自相位调制效应引起的频率位移用下式表示

$$\delta\omega = -\frac{\partial}{\partial\alpha} \Delta\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 L \frac{\partial |E|^2}{\partial\alpha} \quad (5)$$

由式(5)可知, 在光脉冲前沿, 光由弱变强,  $\frac{\partial |E|^2}{\partial\alpha}$  增大,  $\delta\omega$  减小, 其前沿频率变低; 在光脉冲后沿, 光由强变弱,  $\frac{\partial |E|^2}{\partial\alpha}$  减小,  $\delta\omega$  增大, 其后沿频率变高。所以, 自相位调制效应使得脉冲前沿谱向低频分量移动而脉冲后沿谱向高频分量移动。在光纤的反色散区, 脉冲的高频分量运动速度大于低频分量运动速度, 这就引起光脉冲压窄。

当光纤色散单独作用于光脉冲时, 脉冲将产生展宽或畸变, 限制光纤系统性能; 当光纤非线性单独作用于光脉冲时, 则将产生脉冲压缩, 频谱展宽, 亦将限制光纤系统性能; 当在一定条件下, 2种对立的机制同时存在时, 能出现某种平衡, 产生一种新的保持不变形传输的光脉冲——**光孤子**。

## 3 光孤子通信

### 3.1 线性光纤通信

目前实用化的光纤通信系统是以线性光学原理为基础的, 它比起同轴电缆通信有很多优点, 如: 频带宽, 信息容量大; 损耗低, 传输距离长; 体积小, 重量轻, 便于敷设; 抗干扰性好, 保密性强, 使用安全; 材料资源丰富等。但也存在很大的缺陷, 其一, 是**光纤损耗**, 它会造成脉冲能量降低, 幅度下降, 从而限制脉冲无中继传输的上限距离。不过现如今制造工艺和材料提纯技术的提高, 光纤损耗有了很大改善, 已接近理想极限值(0.10 dB/km), 无中继传输距离已达上百公里; 其二, 是**光纤色散**, 色散使光纤通信系统的光脉冲沿光纤展宽, 传输距离越长, 这种展宽效应就越明显, 最终导致脉冲串扰, 增加误码率。因此, 色散成了限制光纤通信容量和通信距离的主要因素。所以, 如果能够设法抵消光纤色散效应, 使光脉冲的形状保持不变, 即可大幅度地提高系统的传输距离和通信容量。这就是光孤子通信的诱人之处。

### 3.2 光孤子通信

光孤子通信为非线性全光通信,是以光孤子作为信息载体,以光导纤维(简称光纤)作为传输介质的一种先进的通信手段。它是实现超长距离、超高码速通信的重要手段,是一种具有巨大潜力的通信方式,并被称为第五代光纤通信系统。如上所述,光纤损耗和色散是线性光纤通信系统的2大缺陷,然而这两者却不存在于光孤子通信系统中,因为一方面光纤传输中损耗可由掺铒光纤放大器(EDFA)的增益来补偿,而传统中继站的光电“接力”(即中继站光子—电子过程、电子—光子过程)被取而代之为对脉冲的直接放大;另一方面光纤中的色散效应被光纤中的非线性效应所补偿而达到平衡,形成光孤子并得以稳定传输,色散反倒成为其必不可少的条件之一。克服上述2大缺陷,光脉冲就可以长距离传输而保持其形状和幅度不变,即形成光孤子。光孤子的特点决定了它在通信领域中的应用前景,通常将基阶光孤子用于通信,因为它在整个传输过程中几乎没有任何变化。光孤子通信之所以发展成为第5代光纤通信,是因为它具有许多突出的优点。

(1) **容量大**。光纤孤子通信系统的传输码速率一般为20 Gbit/s,可望达到1 000 Gbit/s以上。

(2) **误码率低和抗干扰能力强**。基阶孤子波包在传输过程中保持不变以及孤子的绝热特性(即无论有无损耗或增益,其面积都是守恒的。)决定了孤子的误码率远远低于线性光纤通信系统的误码率,甚至可实现误码率低于 $10^{-12}$ 的无差错光纤通信系统。

(3) **传输距离长**。光纤孤子通信系统可实现50 km~80 km无中继传输,若设立若干中继增益放大器,孤子传输距离将达到13 000 km~20 000 km的水平。

(4) **中继放大设施简单**。在光纤孤子通信系统中,由于光纤损耗的存在,孤子峰值减小,脉冲变宽,需要中继放大器以补偿孤子能量。根据孤子的绝热特性,当增益效应(一般采用掺铒光纤放大器)存在时,孤子峰值增加,宽度自动变窄,即能实现自动整形,这样便免去了常规线性通信系统中中继站的复杂再生过程——对脉码的光电转换、重新整形放大、检查误码、电光转换和再重新发送。

(5) 光孤子通信系统由于没有使用电子元器件,因此,可以在很高的温度如1 000 °C的高温下工作。

### 4 光孤子间的相互作用

光孤子具有类似粒子相互作用的特性,2个光孤子之间会相互吸引、排斥或环绕而行,多个光孤子的相互作用会导致光孤子的裂变、聚变、产生或覆灭,甚至会形成孤子束缚态或孤子团,它们之间的相互作用遵

循动量和能量守恒定律<sup>[9]</sup>。因此,要实现高码速的光孤子通信就必须考虑光孤子间的相互作用。光孤子间的相互作用不仅取决于光孤子的初始时间间隔 $2\tau_0$ ,而且也与光孤子的相对相位 $2\theta$ 和相对振幅 $r$ 有关,目前光孤子通信中减少光孤子间相互作用,主要是通过增大孤子对的初始时间间隔来实现。

在光纤的输入端,初始时间间隔为 $2\tau_0$ 的两光孤子脉冲可用下式表示,即<sup>[10]</sup>

$$u(0, \tau) = \text{sech}(\tau - \tau_0) + r \text{sech}[r(\tau + \tau_0)] e^{i2\theta} \quad (6)$$

式(6)中, $r$ 是孤子对的相对振幅, $2\theta$ 是孤子对的相对相位。当在 $\theta = 0, r = 1, 2\tau_0 \gg 1$ 的特殊情况下时,在光纤传播距离 $\xi$ 处,2个孤子间的时间间隔 $2\tau(\xi)$ 由下式给出:

$$\exp[2(\tau(\xi) - \tau_0)] = \frac{1}{2} \{1 + \cos[4\xi \exp(-\tau_0)]\} \quad (7)$$

式(7)表明,2个孤子间的时间间隔 $2\tau(\xi)$ 在光纤中是周期变化的,即两孤子间的作用力是周期性的力,并随着孤子间的初始时间间隔的增加而指数衰减。图1是式(6)中取 $\tau_0 = 3.5, r = 1.0, \theta = 0$ 时两孤子的演化情况,可以看出两孤子由于相互作用而周期性地离合。图2则是式(6)中取 $\tau_0 = 5.0, r = 1.0, \theta = 0$ 时两孤子的演化情况,可见在这种情况下孤子间几乎没有相互作用。研究表明,只要两孤子间的初始归一化时间间隔 $2\tau_0 \geq 10$ ,即孤子间的时间间隔大于孤子脉宽的10倍时,光孤子间的相互作用可忽略。

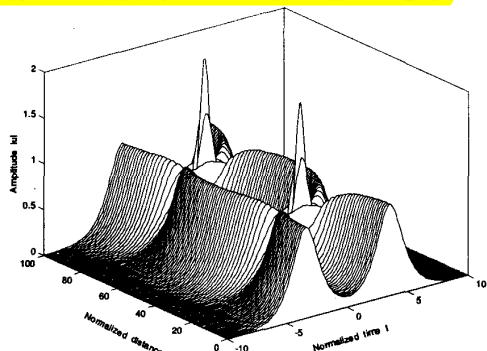


图1 孤子对沿光纤的演化图( $\tau_0 = 3.5, r = 1.0, \theta = 0$ )  
Fig. 1 Evolution of two optical solitons

对于大多数光孤子通信系统来说, $2\tau_0 = 10$ 的初始时间间隔已经足够了。为了充分利用光孤子高码速率的潜力,必须有效地减小其相互作用。为此,人们提出了若干技术方案,如改变输入光孤子的振幅分布使其产生振幅差,对输入光孤子进行相位调制使其产生相位差等。必须指出的是,在实际的光孤子通信中,光孤子相互作用除了与孤子间的距离和非线性有关外,光纤的损耗也会加剧孤子的相互作用

用<sup>[11]</sup>,初始啁啾<sup>[12]</sup>、高阶色散<sup>[13]</sup>与ASE噪声<sup>[14]</sup>等都会对孤子间相互作用产生影响。

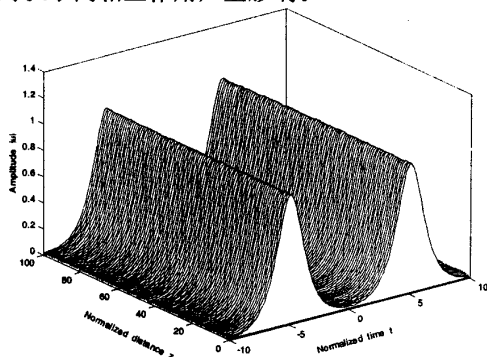


图2 孤子对沿光纤的演化图( $\tau_0=5.0, r=1.0, \theta=0$ )  
Fig. 2 Evolution of two optical solitons

## 5 结束语

光孤子通信是一种充满活力的先进的通信方案,它的超长距离传输、超高码速率的通信潜力,是同轴电缆通信和线性光纤通信无法比拟的,由此决定了它必将**成为未来高速率、长距离通信的主体**。它的实现将成为知识经济时代的超高速公路,并将是未来远程教育信息超高速传输的必然和重要手段。它将带给人类广阔美好的前景,其价值是无法估量的。

### 参考文献:

- [1] RUSSELL J S. Report on waves[R]. Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 1844.
- [2] HASEGAWA A, TAPPERT F. Transmission of stationary nonlinear optical pulse in dispersive dielectric fibers[J]. Appl. Phys. Lett., 1973, 23: 142-144, 171-173.
- [3] MOLLENAURE L F, STOLEN R H, GORDON J P. Experiment observation of picosecond pulse narrowing soliton in optical fibers[J]. Phys. Rev. Lett., 1980, 45(13): 1095-1098.
- [4] 李玲. 光纤通信[M]. 北京:人民邮电出版社, 1995.
- [5] 李玲, 黄永清. 光纤通信基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [6] AGRAWAL G P. Nonlinear Fiber Optics [M]. Academic Press, Inc., 1989.
- [7] 杨祥林, 温扬敬. 光纤孤子通信理论基础 [M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [8] SHEN Y R. Principles of nonlinear optics [M]. New York: Wiley, 1984.
- [9] SEGEV M, STEGEMAN G. Self-trapping of optical beams; Spatial solitons[J]. Phys. Today, 1998, 51(8): 42; Science, 1999, 286: 1518.
- [10] 陈陆君, 梁昌洪. 孤立子理论及其应用—光孤子理论及光孤子通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1997.
- [11] DECEM C, CHU P L. Soliton interaction in the presence of loss and periodic amplification in optical fibers [J]. Opt. Lett., 1987, 12(5): 349-351.
- [12] 杨祥林, 赵阳. 非线性单模光纤中源啁啾孤子相互作用[J]. 光学学报, 1989, 9(11): 995-1001.
- [13] KODAMA Y, NOZAKI K. Soliton interaction in optical fibers[J]. Opt. Lett., 1987, 12(12): 1038-1040.
- [14] GEORGES T and FAVRE F. Influence of soliton interaction on amplifier noise-induced jitter. a first-order analytical solution [J]. Opt. Lett., 1991, 16(21): 1656-1658.
- [15] 常琳, 孟泉水, 赵尚弘. 高阶孤子飞秒激光脉冲的成形机制[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2003, 15(2): 12-13. (编辑:刘勇)

## Optical fiber soliton and optical soliton communication

DAI Hong-ying, WANG Zhong-qing

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China)

**Abstract:** Considering the linear and nonlinear optical effects like group velocity dispersion and Kerr nonlinearity, the authors introduce the conception of optical soliton and its research history. And then, physical mechanism of its forming and its propagation properties are discussed. Based on these properties, the advantages and disadvantages between optical soliton communication and general optical fiber communication are compared. Finally, the influence of interaction between solitons on soliton communication is investigated.

**Key words:** fiber dispersion; fiber nonlinearity; optical soliton; optical soliton communication



作者：[代红英](#)，[汪仲清](#)  
作者单位：[重庆邮电学院, 重庆, 400065](#)  
刊名：[重庆邮电学院学报（自然科学版）](#)   
英文刊名：[JOURNAL OF CHONGQING UNIVERSITY OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)  
年，卷(期)：2004, 16(6)  
被引用次数：6次

## 参考文献(15条)

1. [RUSSELL JS](#) [Report on waves](#) 1844
2. [Hasegawa A; TAPPERT F](#) [Transmission of stationary nonlinear optical pulse in dispersive dielectric fibers](#) 1973
3. [MOLLENAU R F; STOLEN R H; GORDON J P](#) [Experimental observation of picosecond pulse narrowing of soliton in optical fibers](#) 1980(13)
4. [李玲](#) [光纤通信](#) 1995
5. [李玲; 黄永清](#) [光纤通信基础](#) 1999
6. [AGRAWAL GP](#) [Nonlinear Fiber Optics](#) 1989
7. [杨祥林; 温扬敬](#) [光纤孤子通信理论基础](#) 2000
8. [SHEN Y R](#) [Principles of nonlinear optics](#) 1984
9. [SEGEV M; STEGEMAN G](#) [Self-trapping of optical beams: Spatial solitons](#) 1998(08)
10. [陈陆君; 梁昌洪](#) [孤立子理论及其在光孤子理论中的应用——光孤子理论及光孤子通信](#) 1997
11. [DECEMC; CHU P L](#) [Soliton interaction in the presence of loss and periodic amplification in optical fibers](#) 1987(05)
12. [杨祥林; 赵阳](#) [非线性单模光纤中源啁啾孤子相互作用](#) [期刊论文] - [光学学报](#) 1989(11)
13. [KODAMAY; NOZAKI K](#) [Soliton interaction in optical fibers](#) 1987(12)
14. [GEORGE S T; FAVRE F](#) [Influence of soliton interaction on amplifier noise-induced jitter: a first-order analytical solution](#) [外文期刊] 1991(21)
15. [常琳; 孟泉水; 赵尚弘](#) [高阶孤子飞秒激光脉冲的成形机制](#) [期刊论文] - [重庆邮电学院学报\(自然科学版\)](#) 2003(02)

## 本文读者也读过(10条)

1. [王润轩](#) [非线性光孤子通信技术研究](#) [期刊论文] - [激光与光电子学进展](#) 2003, 40(6)
2. [徐铭](#) [光孤子通信理论及实用化进展](#) [期刊论文] - [光通信技术](#) 2004, 28(4)
3. [吴亚丽](#), [WU Ya-li](#) [光孤子通信原理及发展前景](#) [期刊论文] - [光机电信息](#) 2008, 25(4)
4. [马慧; 徐建波](#) [光纤通信系统中孤子的相互作用](#) [期刊论文] - [河北师范大学学报\(自然科学版\)](#) 2004, 28(4)
5. [李俊红](#) [光孤子通信系统中光孤子扰动效应与色散管理的研究](#) [学位论文] 2006
6. [张俊杰](#) [光孤子传输特性及色散管理的研究](#) [学位论文] 2009
7. [李影; 李文田; 魏书军](#) [光孤子通信最新研究进展及技术发展动态](#) [期刊论文] - [光通信技术](#) 2002, 26(5)
8. [蔡炬; 杨祥林](#) [光孤子通信技术的现状与未来](#) [期刊论文] - [半导体光电](#) 2003, 24(1)
9. [丁佳](#) [光孤子通信系统中孤子脉冲传输特性及应用的研究](#) [学位论文] 2009
10. [汤炳书; 沈廷根; 方云团](#), [TANG Bing-shu; SHEN Ting-gen; FANG Yun-tuan](#) [纳米光纤与光孤子通信探讨](#) [期刊论文] - [信阳师范学院学报\(自然科学版\)](#) 2005, 18(2)

## 引证文献(6条)

1. [汪仲清, 万鹏, 安广雷](#) [色散管理孤子群传输特性研究](#)[期刊论文]-[重庆邮电大学学报（自然科学版）](#) 2007(5)
2. [万鹏, 汪仲清, 安广雷](#) [色散管理对初始啁啾孤子传输的影响](#)[期刊论文]-[重庆邮电大学学报（自然科学版）](#) 2008(1)
3. [代红英](#) [ASE噪声对色散管理光孤子的影响](#)[期刊论文]-[重庆邮电大学学报（自然科学版）](#) 2007(z1)
4. [尹庆林, 王玲, 徐大伟](#) [半导体激光器在光孤子通信中的应用](#)[期刊论文]-[光电技术应用](#) 2010(2)
5. [汪仲清, 万鹏](#) [飞秒孤子的传输与色散管理研究](#)[期刊论文]-[重庆邮电大学学报（自然科学版）](#) 2007(6)
6. [李俊红, 汪仲清, 安广雷](#) [色散和Kerr系数扰动影响下光孤子传输演化的研究](#)[期刊论文]-[重庆邮电学院学报（自然科学版）](#) 2006(1)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_cqdyxyxb-zrkx200406019.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cqdyxyxb-zrkx200406019.aspx)